

京都市域の地下空間の浸水解析

Inundation Analysis for Underground Spaces in Kyoto City Area

大八木亮¹・間島真嗣²・戸田圭一³・井上和也⁴

Ryo OYAGI, Shinji AIHATA, Keiichi TODA and Kazuya INOUE

A storage pond model is developed which can treat inundation of both ground and underground spaces in urban area. The continuity equation, momentum equation without advection, and drop formula are used in the model. The model is applied to Kyoto city with the underground spaces of underground malls and subways and so on. In the inundation case of Kyoto city, overflow from the Kamo river is assumed. As a result, the underground malls downtown and adjacent subways are inundated. Also the underground spaces which are far from inundation area of ground are inundated by the water flowing through subways.

「Key Words」 *inundation analysis, storage pond model, underground space, Kyoto City area*

1. 緒言

地下空間の存在する大都市中心部で水害が発生すると、地上だけでなく地下も被害を受ける。地下空間は地上より地盤が低いため、地上の氾濫水が流入しやすいことは、容易に想像できる。地下空間への浸水は、場合によっては人命に関わるため非常に危険である。また、排水がされにくいことによる復旧の遅れや、地下店舗の商品が氾濫水で傷むことなど、物的に見ても被害が大きくなることが考えられる。洪水氾濫による地下浸水を予測するには、地上と地下空間を統合して解析できる氾濫解析モデルがあれば好都合である。

本研究では地上ならびに地下空間を貯留槽(ポンド)に分割し、貯留槽間の流量のやりとりを基に地上・地下空間での洪水氾濫を一体として表現できるポンドモデルを構築している。そして、京都市のほぼ全域の地上部と地下空間を対象として、鴨川の溢水氾濫を想定した浸水解析を行い、地下空間の浸水可能性を考察している。

2. 基礎式および解析手法

地下街の浸水解析には井上ら¹⁾の貯留槽モデル(ポンドモデル)の手法を用いた。そして、地上部と地下鉄の浸水解析にも同じ手法を適用し、地上部と地下空間を統合した。以下に本研究で用いた浸水解析手法を提示する。

「キーワード」 氾濫解析, ポンドモデル, 地下空間, 京都市域

- 1 正会員 工修 三井住友建設
- 2 学生員 京都大学大学院
- 3 正会員 Ph.D. 京都大学教授 防災研究所
- 4 フェロー会員 工博 京都大学教授 防災研究所

2.1 地下空間・地上部の解析手法

図-1 に今回用いるモデルの概念図を示す。地下街は商業スペース、広場、地下鉄改札口、隣接ビルの地階などがつながっている。そこで、各ゾーンを隔てる壁や、地盤高、階層の違いなどによって地下街を複数の領域に分割し、各領域を固有の容積をもった貯留槽と見立てた。これにより、地下街を貯留槽が3次元的に連結した空間として考えることができる。地下街内での浸水の拡がりや、その貯留槽間の流量を求めることで表現することができる。以上のような地下街のモデルに、スロットを組み込んだ解析手法を適用した。

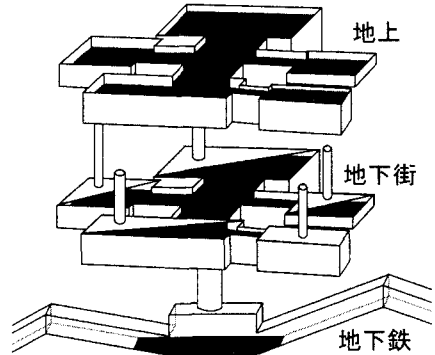


図-1 貯留槽モデルの概念図

地上部にも同様の手法を適用した。ただし、スロットは組み込んでいない。この解析手法を用いたのは複雑な地形場に対してもモデル化が比較的容易であるためである。今回の研究で対象とした地上部は都市化が進んでいて、とくに市市中心部では道路が網羅している。そこで、おもに道路で多数の領域に分割し、それらを貯留槽とみなした。

地下鉄の解析では、地下鉄軌道の空間を勾配、天井高、幅の異なる貯留槽が1次元的に接続したものと考えた。

まず、貯留槽間の連続式は、断面積 A_s のスロットを考えることにより以下のように表す。

<連続式>

$$A \frac{dh}{dt} = \sum_{i=1}^m Q_i + Q_m \quad \text{ただし, } A = A_f : h < D, \quad A = A_s : h \geq D \quad (1)$$

ここで、 A :貯留槽の有効底面積、 A_f :貯留槽の底面積、 A_s :スロットの面積、 h :水深、 t :時間、 Q_i :貯留槽が有する i 番目の界面から流入する流量、 m :流量の出入りが行われる界面数、 Q_m :地上や地下街の他の階層などからの流入流量、 D :貯留槽の天井高である。ただし、地上部の解析では、スロットは用いていないので常に $A = A_f$ となる。

次に、貯留槽間の運動量式は、次式を用いる。

<運動量式>

$$\frac{L}{gA_b} \frac{dQ}{dt} = \Delta H - \alpha L Q |Q| \quad (2)$$

ここで、 ΔH :隣接した貯留槽間の水位差、 Q :流量、 g :重力加速度、 t :時間、 L :隣接した貯留槽の図心間の距離、 A_b :接面の断面積である。また、 α は損失係数であり、マンニングの粗度係数 n を用い、次式のように表す。

$$\alpha = \frac{n^2 s^{4/3}}{A_b^{10/3}} \quad (3)$$

ここで、 s は接面の潤辺である。

本研究では井上ら¹⁾の手法に先端条件を付加した。先端の扱いについては川池²⁾が地上部で適用した手法を用いた。

2.2 上層と下層の接続

地下街と地下鉄空間とをつなぐ階段や地下街内の地下1階と地下2階をつなぐ階段、地上部と地下空間とをつなぐ階段では、上層から下層への氾濫水の落ち込み、あるいは下層が満杯となって氾濫水が下層から上層に逆流する状態が考えられる。そこで、上下層の水のやり取りについては、以下の解析手法を用いる。

上層から下層へ氾濫水が流入し、かつ下層が管路状態でない場合は下層への流入流量を以下の段落ち式で求

める。

$$Q = B\mu h_0 \sqrt{gh_0} \quad (4)$$

ただし, B : 流入口の流下幅, h_0 : 上層の水深とした. ここで, μ は段落ち流れの流量係数である.

下層が管路状態(水位が天井に達している状態)になっている場合、水の移動は上層の水位と下層の水位(スロットの水位)との水位差で行うものとした。流量算出には地下街と地上部の浸水解析で用いた式(2)を用いる。ただし、 ΔH :上層と下層の水位差、 A_k :開口部の断面積、 L :上下層間の床厚である。

3. 対象領域

対象領域は京都市地上部のほぼ全域とその地下にある地下街および地下鉄である。図-2 に対象領域図を示す。地上部の北部と東部は山地部付近まで、西部と南部は地下鉄の引込口がある地点までを目安として対象領域を決定した。地下街は京都駅前地下街、京都御池地下街を対象とした。地下鉄は京都市営地下鉄烏丸線、東西線、阪急電車、京阪電車の4本の鉄道路線を対象としている。4路線とも地下部分すべてを対象としている。ただし、地下鉄東西線は東側を蹴上駅までとした。蹴上駅は三条京阪駅地上部の地盤高より高く、これより東側には水が拵がらないと考えたためである。なお、地上部の対象領域は十分広くとっているため、領域外との水のやり取りはないものとする。

図-3に地上の地盤高図を示す。京都市は北から南に、また、東から西に地盤が低くなっていることがわかる。とくに北から南はその傾向が顕著である。地上の対象領域の面積は約51.6km²である。

京都駅前地下街の概要と地盤高を図-4に示す。京都駅前地下街は地下街、デパートの地階、地下通路などが接続している。また、地下街は地下鉄丸九線京都駅に接続している。同様に、図-5に京都御池地下街の概要と地盤高を示す。京都御池地下街は地下1階の東側が商店街エリアで、地下1階西側と地下2階全体は地下駐車場となっている。また、地下3階は地下鉄東西線京都市役所前駅のホームである。

地下鉄烏丸線、東西線の縦断図を、それぞれ図-6、図-7に示す。これらの図を見てわかるように、地下鉄は全区間にわたって勾配が変化し、また高低差があるので、氾濫水がたまりやすいところとそうでないところがあるのが容易に想像できる。

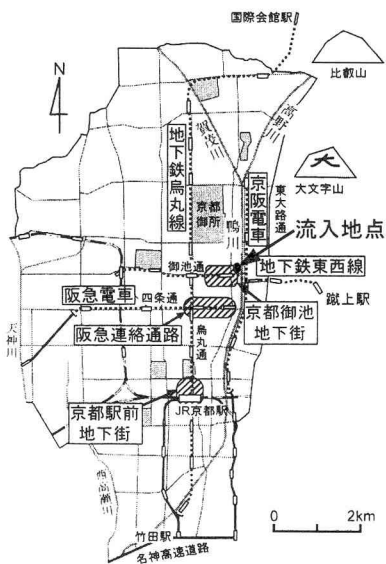


図-2 地上の対象領域

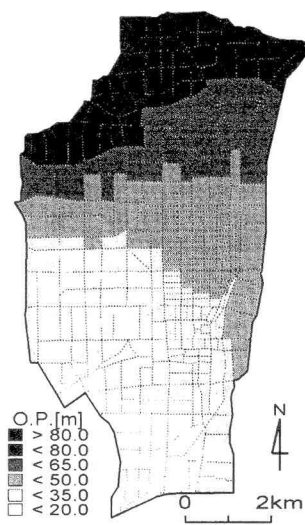


図-3 地上の地盤高図

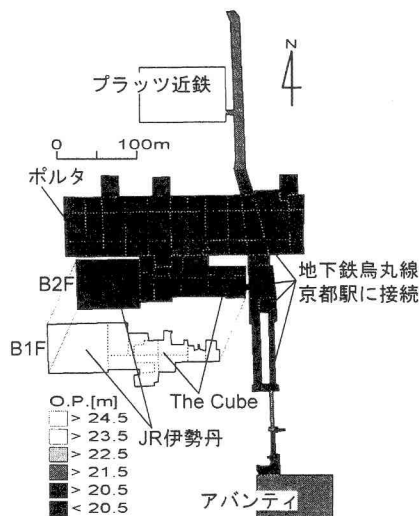


図-4 京都駅前地下街の概要と地盤高

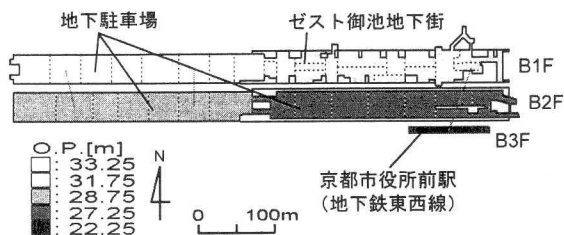


図-5 京都御池地下街の概要と地盤高

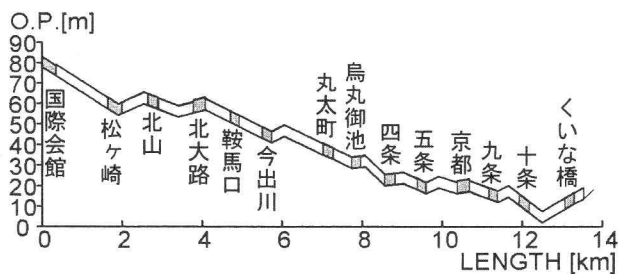


図-6 縦断面図(烏丸線)

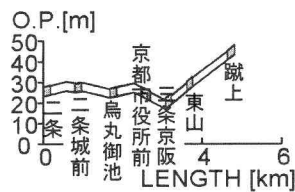


図-7 縦断面図(東西線)

4. 計算条件

図-8 に示すような流量を計算開始と同時に御池大橋右岸の格子(図-2 参照)に流入させた。

計算時間ステップは $\Delta t = 0.05$ (s), 段落ち式の流量係数は $\mu = 0.544$ とした。マンングの粗度係数は、地上部では $n = 0.067$, 地下街, 地下鉄, 上層と下層のつながりでは $n = 0.030$ とした。スロット面積は地下街, 地下鉄ともに格子の底面積に対して 2% とした。なお, 地上部から地下空間への流入口には一律に 15cm の段差があるものとした。

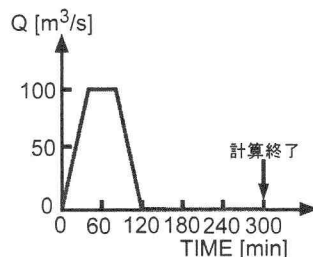


図-8 流入流量の時間変化

5. 計算結果と考察

地上部, 京都駅前地下街, 京都御池地下街の浸水深図(平面図)をそれぞれ図-9, 図-10, 図-11 に, 地下鉄東西線の浸水深図(縦断面図)を図-12 に示す。

計算開始後 30 分後には図-11 より, 京都御池地下街東側で浸水していることがわかる。このとき, 図-9 によ

ると、地上部では鴨川の右岸沿いに浸水域が拡大し、七条通にまで浸水域が拡大している。これは、鴨川右岸付近の地盤高が低いことによるものである。

計算開始 60 分後になると、京都御池地下街では、計算開始 30 分後に比べて東側で浸水域が拡大し、浸水深も大きくなっている。また、地下 3 階京都市役所前駅ホームでは浸水深が 1.5m 以上と大きくなっている。

計算開始 90 分後には図-10 に示すように、京都駅前地下街が浸水している。また、計算開始 120 分後には、京都駅前地下街では浸水域が一部で拡大している。京都御池地下街では、計算開始 60 分後と比べると地下 2 階で浸水深が大きくなっている。地下鉄東西線では、図-12 によると、計算開始 90 分後には三条京阪駅付近が浸水していることがわかる。地下鉄東西線の駅と地上部の浸水域が重なっているのは、90 分後では京都御池地下街付近のみであるので、地下鉄東西線の氾濫水は京都御池地下街にある京都市役所前駅を経由して流入したことがわかる。なお、120 分後では全氾濫水量 $48 \times 10^4 \text{ m}^3$ のうち約 7% となる約 $3.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ が地下空間に流入する。

以上に述べた数値解析結果から、鴨川の右岸が市中で溢水した際には、鴨川に近い御池の地下空間だけでなく、京都駅周辺の地下空間も浸水の危険があることが明らかとなった。また、京都御池地下街に侵入した氾濫水は、京都市営地下鉄の京都市役所前駅から地下鉄東西線軌道に入って三条京阪駅付近に滞留することも知られた。

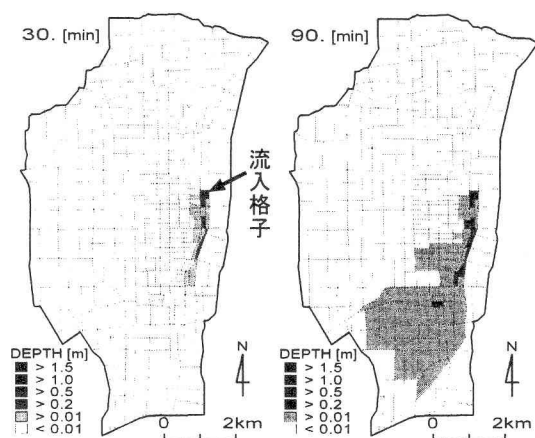


図-9 地上の浸水深図

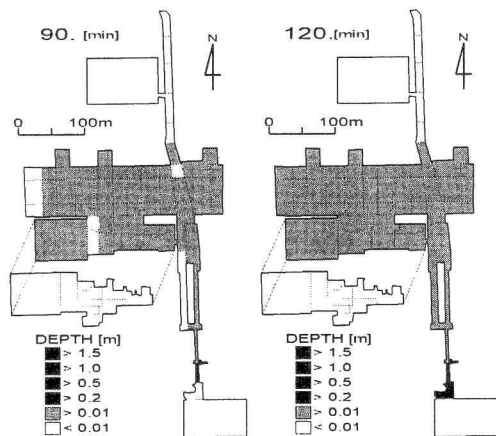


図-10 京都御池地下街の浸水深図

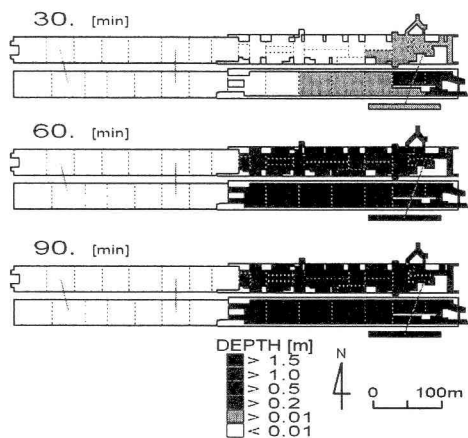


図-11 京都御池地下街の浸水深図

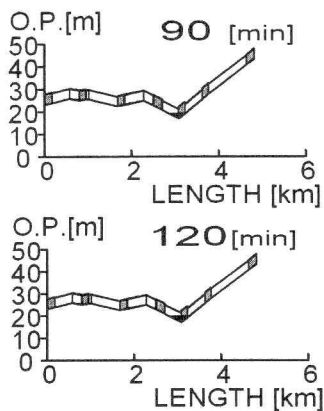


図-12 地下鉄東西線の浸水深図

6. 結言

京都市域での解析の結果、鴨川の右岸が市中で溢れた際には、中京区の御池地下街だけでなく、下京区の京都駅周辺の地下街も浸水する危険性が高いことが明らかとなった。また、氾濫水が地下鉄空間に流入した際には、地下鉄軌道を経由することにより地上の氾濫域から離れた場所まで浸水が拡大する危険性があることも知られた。

京都市域の地下浸水に関する今後の対策としては以下のようなことが挙げられる。

- (1) 鴨川の状況が京都御池地下街の管理者、ならびに京都市役所駅前の駅員に即座に伝達され、とくに鴨川の溢水が予想される状況では、直ちに地下街、地下鉄利用者を地上に退避させる指示を下せる情報伝達システムの構築が急務である。また鴨川の溢水が予想される状況下では、地下鉄東西線の運行を即座に停止させる必要がある。
- (2) JR 京都駅の地下空間にも、鴨川からの氾濫水が流下してくると予想される。流入口と考えられる北側ならびに東側は、十分な警戒が必要である。
- (3) 地下空間の深部に取り残された人の救出にあたっては、地下から地上へは、氾濫水の流入に逆らって階段部を移動することとなる。増水する河川での遭難者を救出する場合と類似な状況と推察され、街中にあっても消防隊員は、水難事故者の救出に用いるのと同様の服装や道具を用意しておく必要があると考えられる。

謝辞：地下空間に関する資料を提供いただいた京都市交通局の関係各位に感謝いたします。本研究は平成 15 年度科学研究費補助金「都市水害に関する流域治水論的研究(研究代表者：井上和也)」ならびに、平成 15 年度(財)国土技術研究センター研究開発助成「地下空間の水害危険度評価手法の開発と防御システムに関する研究(研究代表者：戸田圭一)」の援助の下に実施された。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 井上和也・戸田圭一・川池健司・栗山健作・大八木 亮：地下空間における浸水過程の解析について，京都大学防災研究所年報第 45 号 B，pp.173-184，2002.
- 2) 川池健司：都市における氾濫解析法とその耐水性評価への応用に関する研究，京都大学博士論文，2001.